

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА, ТЕПЛОТЕХНИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 621.5:519.6

А. А. Андрижиевский¹, А. Г. Трифонов¹, Л. С. Кулик²

¹Белорусский государственный технологический университет

²ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны»
Национальной академии наук Беларуси

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ ОТВОДА ТЕПЛА ОТ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ АЭС В РЕЖИМЕ ТЕРМОКОНВЕКЦИИ

В рамках формализованных шаблонов программного пакета COMSOL Multiphysics разработан модельный аналог системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки АЭС. Для численной реализации модельного аналога системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки использовался метод конечных элементов в интерпретации системы COMSOL Multiphysics. В связи с большим числом расчетных ячеек теплообменник-конденсатор системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки в расчетах представлен в виде плоских поверхностей. Модель описания процессов переноса строится на решении универсальных уравнений сохранения количества движения, массы и тепловой энергии. В расчете решается нестационарная задача на установление. На границе теплопередающих поверхностей принято граничное условие второго рода. По результатам численного моделирования получено, что теплообменник-конденсатор системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки работает в импульсном режиме. Скачки расхода теплоносителя составляют 150–200 с, что подтверждено в экспериментах Центрального котло-турбинного института. Получен удельный тепловой потокот 2 до 5 кВт/м² и суммарный тепловой поток от 60 до 150 кВт на одну секцию в зависимости от температурных условий под куполом и теплоотдачи на теплообменной поверхности.

Ключевые слова: аварийные выбросы АЭС, процессы переноса, моделирование, вычислительный шаблон.

A. A. Andrizhievskiy¹, A. G. Trifonov¹, L. S. Kulik²

¹Belarusian State Technological University

²Joint Institute for Power and Nuclear Research –
Sosny of National Academy of Sciences of Belarus

MODELING OF PASSIVE HEAT REMOVAL SYSTEM OF NUCLEAR POWER PLANT CONTAINMENT IN THERMAL CONVECTION MODE

The modeling analogue of system of passive heat removal from a protective cover is developed within the limits of the formalized templates of COMSOL Multiphysics software package. The method of final elements in COMSOL Multiphysics system interpretation was used for numerical realization of modeling analogue of system of passive heat removal from a protective cover. The heat exchanger of system of passive heat removal from a protective cover is presented in calculations in the form of flat surfaces because of a great number of settlement cells. The non-stationary problem in establishment is solved in calculation. By the results of numerical modeling it is received that the heat exchanger and condenser of system of passive heat removal from a protective cover works in a pulse mode. Recurrence of jumps of the expense of the heat-carrier in computing experiments made size of an order 150–200 sec. The specific thermal stream and total thermal stream per one section of the heat exchanger of system of passive heat removal depending on temperature conditions under a dome of a protective cover of NPP was received.

Key words: emergency emissions of NPP, transfer processes, modeling, computing template.

Введение. В обеспечении безопасности АЭС определяющей проблемой остается надежность отвода остаточных тепловыделений. Система аварийного охлаждения реактора является наиболее сложной и ответственной, в значительной

степени определяющей идеологию построения структуры станции в целом.

Приоритетность пассивных средств и способов защиты станций определяется их принципиальными преимуществами по сравнению

с активными системами: функционирование без потребления электроэнергии, отсутствие необходимости применения управляющих сигналов от контрольно-измерительной аппаратуры и вмешательства эксплуатационного персонала [1, 2].

В настоящее время в мире ведется широкий поиск новых подходов к проблеме создания пассивных систем расхолаживания реакторной установки, а также пассивных систем для преодоления последствий запроектных аварий с разгерметизацией первого контура, таких, например, как системы отвода тепла от защитной оболочки. Обычно задача решается путем использования запаса воды в емкостях. Системы работают на естественной циркуляции теплоносителя, причем энергия остаточного тепловыделения отводится путем нагрева и испарения определенного запаса воды. При этом считается, что условия возникновения и развития аварии позволяют через определенный промежуток времени (примерно 72 ч) восстановить управление, электроснабжение, подачу охлаждающей воды и т. д.

Для управления запроектными авариями предусмотрены пассивные системы отвода тепла от парогенераторов (СПОТ ПГ) и от защитной оболочки (СПОТ ЗО).

Система пассивного отвода тепла от защитной оболочки обеспечивает длительный (не менее 24 ч) отвод тепла из объема защитной оболочки при запроектных авариях, связанных с потерей теплоносителя первого контура, полным обесточиванием и отказом спринклерной системы. СПОТ ЗО (рис. 1) включает в себя теплообменники-конденсаторы, размещенные в верхней части объема контейнмента и связанные трубопроводами с баками аварийного отвода тепла (БАОТ).

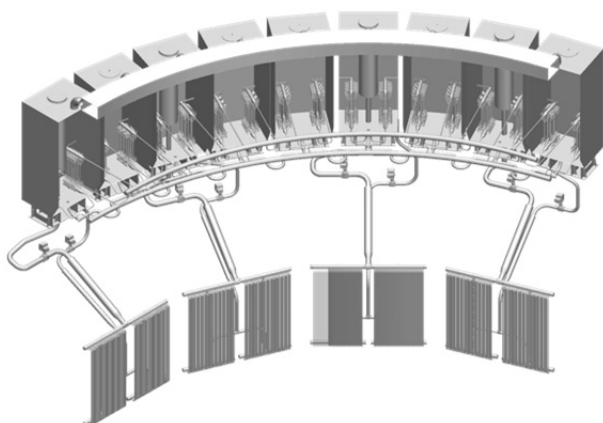


Рис. 1. Система пассивного отвода тепла от защитной оболочки АЭС

При авариях, сопровождающихся поступлением пара в контейнмент и ростом температуры в нем, начинается отвод тепла к теплообменни-

кам-конденсаторам за счет процессов естественной конвекции и конденсации. При этом возникает естественная циркуляция в контуре СПОТ ЗО и отвод тела к воде в аварийных баках.

Основная часть. Цель работы:

- разработка методической основы имитационного моделирования теплогидравлических процессов в теплообменных аппаратах и контурах пассивных систем отвода остаточных тепловыделений от реакторной установки и защитной оболочки к конечному поглотителю проекта «АЭС-2006»;

- создание имитационного программного комплекса для расчета пассивных систем безопасности проекта «АЭС-2006»;

- проведение ряда вычислительных экспериментов для определения оптимальных условий работы пассивных систем безопасности проекта «АЭС-2006» и разработка управляющих алгоритмов;

- обоснование проектных характеристик пассивных систем безопасности проекта «АЭС-2006» применительно к условиям Республики Беларусь.

Теплогидравлические процессы, протекающие во время работы в теплообменных аппаратах и контурах СПОТ ПГ и СПОТ ЗО, происходят в условиях естественной циркуляции и фазовых переходах теплоносителя и являются достаточно сложными для их аналитического разрешения. Экспериментальные исследования являются дорогостоящими и требуют большого времени на создание стенда и проведение большего числа экспериментов для набора статистики. Оптимальным в данном случае является создание имитационной компьютерной модели и проведение численных экспериментов.

Исследование пассивных систем с естественным охлаждением требует совместного моделирования следующих нестационарных процессов:

- конденсации пара из парогазовой смеси под защитной оболочкой на внешней теплообменной поверхности трубных пучков теплообменников-конденсаторов СПОТ ЗО;

- тепломассообменных процессов в контейнменте защитной оболочки;

- конденсации теплоносителя (с учетом накопления неконденсирующихся газов) в трубных пучках теплообменников аварийного расхолаживания СПОТ ПГ;

- режимов кипения на внешних поверхностях трубных пучков теплообменников аварийного расхолаживания СПОТ ПГ, возможности возникновения режима пленочного кипения;

- перемешивания охлаждающей воды в баке аварийного охлаждения при отводе тепла от теплообменников аварийного расхолажи-

вания СПОТ ПГ, связанное стермоконвекцией и кипением;

– устойчивости работы контуров охлаждения СПОТ ПГ и СПОТ ЗО.

В данной работе в рамках формализованных шаблонов программного пакета COMSOL Multiphysics был разработан модельный аналог СПОТ ЗО.

Модель описания процессов переноса строится на решении универсальных уравнений сохранения количества движения, массы и тепловой энергии [3]:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} - [\eta(\nabla U + \nabla U)^T] + \\ + \rho U \nabla U + \nabla P(T - \bar{T}) \cdot g \cdot \rho \cdot \beta_{\text{жид}} = 0; \\ \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla(\lambda \nabla T) + Q_V,$$

где ρ – плотность среды; U – скорость потока; η – коэффициент динамической вязкости; P – гидростатическое давление; T – температура; $\beta_{\text{жид}}$ – коэффициент сжимаемости жидкости; C_p – удельная теплоемкость; \vec{u} – вектор скорости; λ – коэффициент теплопроводности; Q_V – объемный тепловой источник. Верхний индекс T – турбулентная составляющая, определяемая согласно к-ε модели турбулентности в интерпретации COMSOL Multiphysics.

Дополнительно решалось следующее уравнение сохранения массы паровой фазы над зеркалом испарения (для расчета теплового потока вследствие испарения):

$$\frac{\partial c''}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla c'' = \nabla(D'' \nabla c''),$$

где c'' – концентрация пара; D'' – коэффициент диффузии пара в воздухе.

Суммарный тепловой поток через поверхность раздела фаз имеет следующий вид:

$$q_{\text{sum}} = q_{\text{ev}} + q_{\text{con}},$$

где q_{ev} – тепловой поток вследствие испарения; q_{con} – тепловой поток в результате конвекции.

Суммарный тепловой поток в приближении метода приведенной пленки вблизи поверхности определялся как [4, 5]

$$q_{\text{sum}} = \frac{Nu}{L} \left[\lambda_{\text{mix}} (T_{\text{sf}} - T_{\infty}) + \right. \\ \left. + D'' \rho_{\text{mix}} k \cdot \ln \left(\frac{(m_{\text{mix}} (1 - c''))_{\infty}}{(m_{\text{mix}} (1 - c''))_{\text{sf}}} \right) \right],$$

где Nu – число Нуссельта; L – характерный линейный масштаб процессов у поверхности; λ_{mix} – коэффициент теплопроводности паровоздушной

смеси; T_{sf} – температура насыщения (у поверхности); T_{∞} – температура на удалении от поверхности; D'' – коэффициент диффузии пара в воздухе; ρ_{mix} – плотность паровоздушной смеси; k – скрытая теплота парообразования; m_{mix} – масса паровоздушной смеси; c'' – концентрация пара.

Для численной реализации модельного аналога СПОТ ЗО использовался метод конечных элементов в интерпретации системы COMSOL Multiphysics (рис. 2).

В качестве объекта имитационного моделирования рассматривался представленный на рис. 2 базовый элемент СПОТ ЗО, состоящий из двух теплообменников-конденсаторов и бака аварийного отвода тепла.

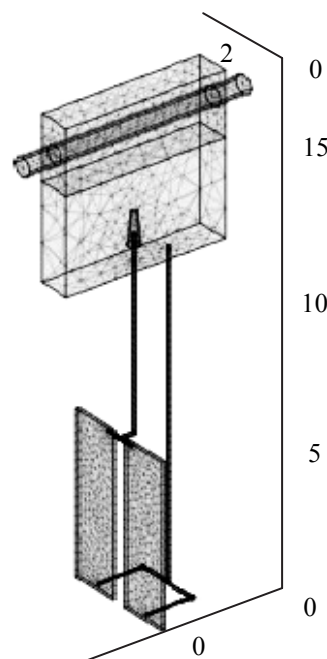


Рис. 2. Модельный аналог элемента СПОТ ЗО с разбиением конечных элементов в интерпретации системы COMSOL Multiphysics

Горячий воздух вместе с парами водяного теплоносителя конденсируется и отдает тепло теплообменнику-конденсатору СПОТ. Соответственно происходит нагрев внутреннего теплоносителя. Вследствие разности плотностей организуется конвекция внутри контура СПОТ. Нагретый теплоноситель поднимается вверх по трубам и поступает в БАОТ через отбойник, а холодная жидкость из БАОТ опускается вниз и через нижний коллектор поступает в теплообменник-конденсатор. В БАОТ жидкость нагревается и через внешнюю открытую поверхность уносится во внешнюю среду. Связь с внешней средой установлена через гидрозатвор (в данной работе не рассматривается). Теплоотвод из-под купольного пространства осуществляется до тех пор, пока не произойдет испарение всей воды в БАОТ.

В связи с большим числом расчетных ячеек теплообменник-конденсатор в расчетах представлен в виде плоских поверхностей.

В рамках выполненных вычислительных экспериментов решалась нестационарная задача на установление. Исходные данные для расчета приведены в таблице.

Исходные данные для расчета

Параметр	Значение
Температура под оболочкой, К	375
Начальная температура в баке охлаждения, К	293
Коэффициент сжимаемости для воды (1/К)	0,005
Давление окружающей среды, Па	102 350
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² · К)	22
Геометрический размер секции, м	5×1,5×0,1
Геометрический размер трубопроводов, м	0,1
Геометрический размер БАОТ, м	5×5×1

В начальный момент температура принимается равной 293 К. При возникновении аварийной ситуации температура под куполом принимается равной 375 К. На границе теплопередающих поверхностей принято граничное условие второго рода.

В данных вариантных расчетах коэффициент теплоотдачи принимался равным от 10 до 22 Вт/(м² · К). Начальный уровень воды в баке БАОТ равен 3 м.

Результаты эксперимента представлены на рис. 3–5.

Для численного моделирования был выбран начальный период эксплуатации СПОТ 30 при выходе на квазистационарный режим. При этом наибольший температурный перепад по высоте наблюдается в двух симметричных секциях теплообменника-конденсатора. Наиболее развитое конвективное течение происходит в БАОТ над зеркалом испарения в паровоздушном объеме, что видно по интенсивности функций тока (рис. 3).

По результатам вычислительного эксперимента установлено, что в зависимости от температурных условий под куполом и уровня теплоотдачи на теплообменной поверхности удельный тепловой поток равен от 2 до 5 кВт/м² (на одну секцию СПОТ 30 (секций 64)), что соответствует суммарному тепловому потоку от 60 до 150 кВт.

На рис. 4 представлена динамика изоповерхностей температуры с выходом СПОТ 30 на квазистационарный режим работы.

Как следует из вида изоповерхностей температуры на рис. 4, наблюдается их совпадение через некоторые промежутки времени, что свидетельствует об импульсном режиме работ СПОТ 30. При этом в рамках вычислительного эксперимента получено, что скачки расхода теплоносителя происходят через ≈150–200 с. Наличие импульсного режима в работе СПОТ 30 согласуется с результатами экспериментальных исследований [5].

В секциях теплообменника-конденсатора можно выделить отдельные взаимовлияющие процессы. В начальный момент времени, когда теплоноситель в секциях относительно холодный, наблюдается интенсивный подвод тепла вследствие увеличенной разности температур под оболочкой и на теплообменной поверхности. Однако движущая сила по контуру невелика, соответственно, и скорость циркуляции по контуру также невелика. По мере прогрева секций теплообменника возрастает подъемная сила,двигающая теплоноситель по контуру. Одновременно с этим процессом происходит заброс холодной воды из БАОТ в нижнюю часть теплообменника, что снижает движущую силу. Такие процессы носят периодический характер.

Периодичность колебания скорости теплоносителя (соответственно и расхода) в средней части секции теплообменника-конденсатора в рамках вычислительных экспериментов иллюстрируется рис. 5.

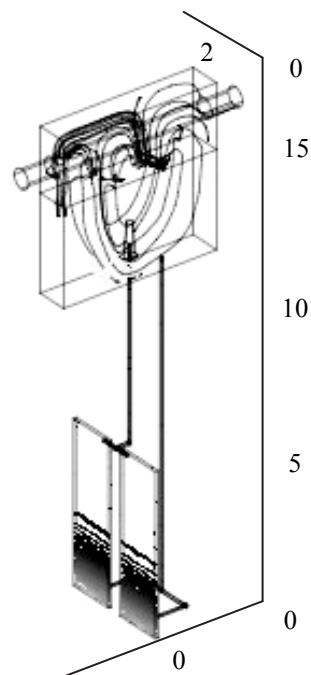


Рис. 3. Расчетные значения изоповерхностей температуры и функции тока при эксплуатации СПОТ 30 – шкала температур изменяется от 293К (светлый тон) до 303К (темный тон)

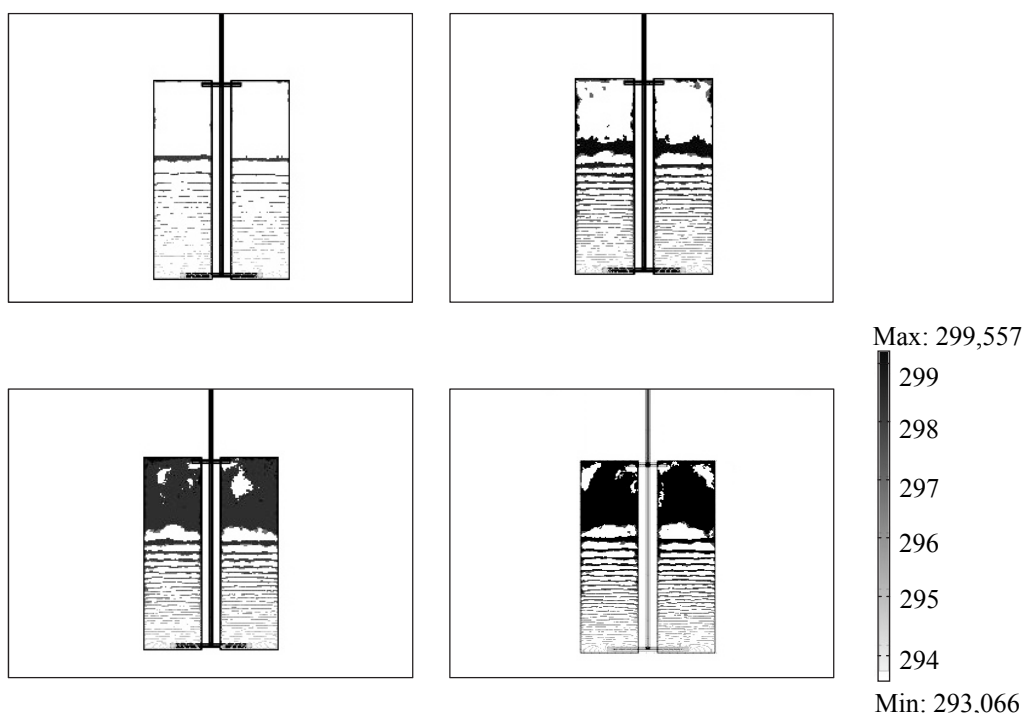


Рис. 4. Градиентное представление динамики изоповерхностей температуры в моменты времени 0; 50; 150; 200 с от начала сброса (градиент температур согласно рис. 3)

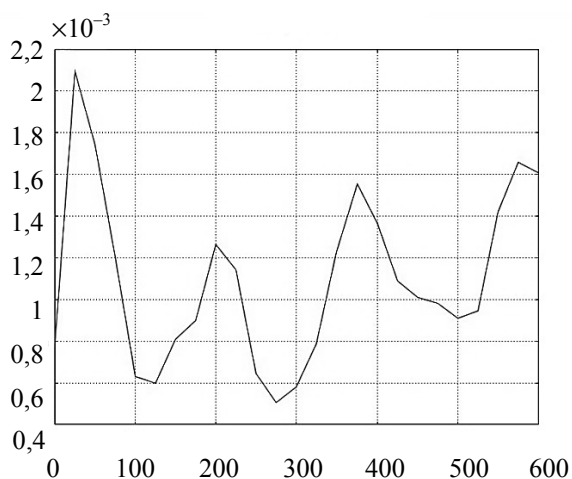


Рис. 5. Периодические изменения скорости теплоносителя в средней части секции теплообменника-конденсатора

Импульсный характер движения отмечается на всех режимах от начального периода запуска до перехода в квазистационарный режим.

Заключение. В рамках формализованных шаблонов программного пакета COMSOL Multiphysics разработан пространственный модельный аналог процессов тепломассопереноса

в системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки АЭС.

Показано, что интенсивность циркуляции теплоносителя в контуре пассивной системы отвода тепла имеет циклический характер. Указанный вычислительный результат согласуется с выводами экспериментальных исследований на натурных образцах СПОТ 3О. В данной работе даны возможные физические причины указанного явления на начальной стадии работы СПОТ 3О. Вместе с тем при протекании теплообменных процессов в области кипения теплоносителя импульсный характер работы спот может быть связан с явлением динамической неустойчивости системы охлаждения вследствие кризиса кипения второго рода.

В расчетах получено, что в зависимости от температурных условий под куполом и теплоотдачи на теплообменной поверхности удельный тепловой поток равен от 2 до 5 кВт/м² на одну секцию (секций 64), что соответствует суммарному тепловому потоку от 60 до 150 кВт.

Разработанный вычислительный шаблон и результаты данного исследования могут быть использованы для проведения анализа безопасности работы белорусской АЭС.

Литература

1. Безлепкин В. В., Семашко С. Е., Сидоров В. Г., Ивков И. М. ЛАЭС II: обоснование пассивных систем безопасности // РосЭнергоАтом. 2008. № 2. С. 18–23.
2. Свириденко И. И. Показатели надежности автономной системы пассивного отвода теплоты ВВЭР на основе двухфазных термосифонов // Сборник научных трудов СНИЯЭиП / СНИЯЭиП. 2005. № 14. С. 14–25.

3. Андрижиевский А. А., Пронкевич Т. Ю., Трифонов А. Г. Оценка условий теплообмена в бассейне выдержки отработавшего ядерного топлива с учетом эффекта испарения // Труды БГТУ. 2012. № 3: Химия и технология неорганич. в-в. С. 145–149.

4. Ландау, Л. Д. Лифшиц, Е. М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964. 568 с.

5. Андрижиевский А. А., Михалевиц А. А., Трифонов А. Г. Моделирование термоконвективных течений в динамических газожидкостных слоях водных охладителей // Доклады Академии наук Беларуси. 1995. Т. 39. № 3. С. 109–113.

References

1. Bezlepkin V. V., Semashko S. E., Sidorov V. G., Ivkov I. M. LNPP 2: support of passive safety systems. *RosEnergoatom* [RosEnergoatom], 2008, no. 2, pp. 18–23 (in Russian).

2. Sviridenko I. I. Reliability of passive heat dissipation system of PWR based on two-phase thermosyphons. *Sbornik trudov SNIYaEiP* [The collection of proceedings of the SNUNEP], 2005, no. 14, pp. 14–25 (in Russian).

3. Andrizhievskiy A. A., Pronkevich T. Y., Trifonov A. G. Assessment of conditions of heat exchange in the extracts of spent nuclear fuel, taking into account the effect of evaporation. *Trudy BGTU* [Proceedings of the BSTU], 2012, no. 3, pp. 145–149 (in Russian).

4. Landau L. D., Lifshits E. M. *Statisticheskaya fizika* [Statistical physics]. Moscow, Nauka, 1964. 568 p.

5. Andrizhievskiy A. A., Mihalevich A. A., Trifonov A. G. Modelling of thermal convective currents in gas-fluid dynamic layers of water cooler. *Doklady akademii nauk Belarusi* [Reports of Academy of Sciences of Belarus], 1995, vol. 39, no. 3, pp. 109–113 (in Russian).

Информация об авторах

Андрижиевский Анатолий Альгертович – доктор технических наук, профессор кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Сverdlova, 13a, Республика Беларусь). E-mail: aaandri@mail.ru

Трифонов Александр Георгиевич – доктор технических наук, профессор кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Сverdlova, 13a, Республика Беларусь). E-mail: tral@list.ru

Кулик Лилия Сергеевна – младший научный сотрудник. ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси (220109, г. Минск, ул. акад. А. К. Красина, 99, Республика Беларусь). E-mail: knopka.lija@mail.ru

Information about the authors

Andrizhievskiy Anatoliy Al'gertovich – D. Sc. Engineering, professor, Department of Energy-Saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aaandri@mail.ru

Trifonov Alexander Georgievich – D. Sc. Engineering, professor, Department of Energy-Saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tral@list.ru

Kulik Liliya Sergeevna – junior researcher. Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of National Academy of Sciences of Belarus (99, Academician A. K. Krasin str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: knopka.lija@mail.ru

Поступила 19.02.2015